

被告準備書面(12)(2016年3月9日付け)への反論

2016年4月8日

大阪府立大学名誉教授

長沢 啓行

第2 質問事項の「2 基準地震動について」に関する説明

3 (4) について

(1) ウについて

ウ ③について

(イ)

被告は、「耐専スペクトルに代表される距離減衰式は」「地震動の応答スペクトルの平均的な値を経験的に算出する方法」であり、「断層モデルを用いた手法による地震動評価で用いられるスケーリング則も」「平均的なパラメータを求める方法」であり、「いずれについても、地震が自然現象であることからしてデータベースがばらつくことは当然である。」としている。これは、耐専スペクトルも断層モデルも平均的な値による地震動評価であることを認め、実際のデータはその周りにばらつくことを認めている。ところが、「こうしたばらつきは、ある観測地点における地震動に地域特性、すなわち、『震源特性』、地震波の『伝播特性』、地盤の『増幅特性』が反映されることにより生じる(つまり、データベースのばらつきは、各データが観測された地点の地域特性そのものである。)」とし、地域特性を考慮すればデータのばらつきはなくなるかのように主張している。これは根本的に間違った非科学的な主張である。

内山・翠川(2013)は、このようなデータのばらつきには「認識論的不確定性」と「偶然的不確定性」の2種類があり、前者は低減可能だが、後者は低減不可能であり、本来、地震動評価では偶然的不確定性のみを用いるべきであり、両者を定量的に分離することが重要だと指摘している。すなわち、「地震動強さのばらつきは、認識論的不確定性(epistemic uncertainty)と偶然的不確定性(aleatory uncertainty)に分離することができる。認識論的不確定性は、より正確なモデル化や新しい知見・データを追加することで低減可能なばらつき、偶然的不確定性は新しい知見・データが追加されても低減不可能なばらつきである。」「震源特性における震源メカニズムや破壊伝播方向、伝播経路における媒質(速度、減衰構造)の不均質性、サイト特性における地盤の不整形性や入射角などによる地震動強さの違いは予め想定することが困難であり、これらが地震間および地震内のばらつきにおける偶然的不確定性の要因になっていると考えられる。」(下線は引用者)「地震間のばらつきは震源特性、地震内のばらつきは伝播経路・サイト特性がばらつきを与える主たる要因として指摘されている。」このような位置づけの下、内山・翠川(2013)は、防災科学研究所のK-NETおよびKiK-netを対象に、K-NETの運用が開始された1996年から2010年12月までに発生した $4.5 \leq M_w \leq 6.0$ かつ震源深さ100km以浅の中小地震で得られた強震記録、756地震40,193データ(165内陸地殻内地震8,431データ、439プレート境界地震22,242データ、152スラブ内地震9,520データ)という膨大な量の国内地震データに基づいて、最大加速度または最大速度を求める距離減衰式を回帰させ、データのばらつきを分析している。その結果、最大加速度のばらつきは「平均値+標準偏差」が平均値の2.34倍になる大きさであること、地震間のばらつきの43%が偶然的不確定性によるものであることを導出している。地震内のばらつきにおいても同様になるとすれば、たとえ、被告が主張するように「不確かさの考慮」によって「認識論的不確定性によるばらつきをゼロにできた」としても、低減不可能な偶然的不確定性によるばらつきは依然として存在するのであり、その大きさは「平均値+標準偏差」が平均値の1.75倍になる大きさだということになる。より詳細には、次の通りである。

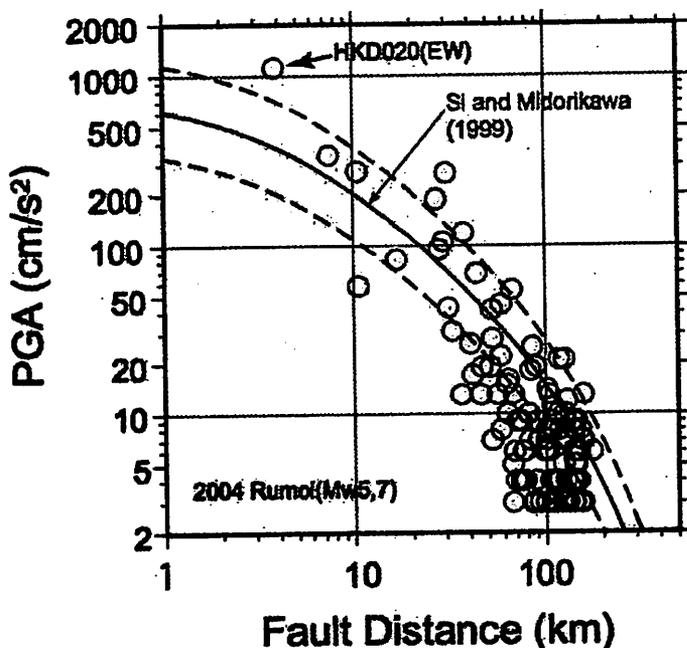
内山・翠川(2013)は、最大加速度の距離減衰式に関する回帰誤差を分析した結果、地震間のばらつきの自然対数標準偏差を0.522(「平均値+標準偏差」は平均値の $e^{0.522}=1.69$ 倍になる)、地震内のばらつきの自然対数標準偏差を0.672($e^{0.672}=1.96$ 倍)と導いている。これより、全体のばらつきの自然対数標準偏差は $0.851(=[0.522^2+0.672^2]^{0.5}, e^{0.851}=2.34$ 倍)になる。内山・翠川(2013)はさら

に、地震間のばらつきについて、認識論的不確定性によるばらつきと偶然的な不確定性によるばらつきに分離し、それぞれの自然対数標準偏差を $0.361 (e^{0.361}=1.43 \text{ 倍})$ と $0.315 (e^{0.315}=1.37 \text{ 倍})$ と求めている。したがって、地震間のばらつき全体の自然対数標準偏差は $0.479 (= [0.361^2+0.315^2]^{0.5}, e^{0.479}=1.61 \text{ 倍})$ となり、元の $0.522 (e^{0.522}=1.69 \text{ 倍})$ より少し小さいが、これはばらつきを分離するための理論式に付随するやむを得ない誤差である。これより、地震間の自然対数分散の $43\% (0.315^2/[0.361^2+0.315^2]=0.432)$ が偶然的な不確定性によるものだという結果が得られる。内山・翠川(2013)は今後、地震内のばらつきについても同様の分析を行う予定だが、地震内のばらつきについても自然対数分散の 43% が偶然的な不確定性によるものだとすれば、地震間と地震内を合わせたばらつきのうち偶然的な不確定性によるばらつきは、自然対数分散で $0.559^2 (=0.43 \times 0.522^2 + 0.43 \times 0.672^2)$ 、自然対数標準偏差で $0.559 (e^{0.559}=1.75 \text{ 倍})$ になる。

内山・翠川(2013)の地震データには $M_w6.0$ を超える大地震のデータが含まれていないが、その理由はばらつきの分析精度を高めるためである。具体的には、次のように述べている。「大地震を対象にした場合には、中小地震に比べてその震源位置の空間分解能が疎になることにより、統計的に有意な解が得られない可能性が考えられる。また、規模の大きな地震を対象とした場合にはディレクティビティ効果など、ばらつきに影響を与える要因が中小地震よりも多くなると考えられることから、ばらつきに影響を与える要因を減らし、その解釈をより明確にするために中小地震 ($4.5 \leq M_w \leq 6.0$) を対象とした検討を行う。」したがって、大地震に対しては、ばらつきの要因が増えるため、一層複雑な検討が必要であり、認識論的不確定性についても、偶然的な不確定性についても、より大きなばらつきが伴うことを考慮しておく必要があると言える。

(出典：内山泰生・翠川三郎，距離減衰式における地震間のばらつきを偶然的・認識論的不確定性に分離する試み，日本地震工学会論文集，第13巻，第1号，pp.37-51(2013))

実際には、認識論的不確定性をゼロにするなどということは不可能に近く、認識論的不確定性の残りのばらつきと偶然的な不確定性によるばらつきを合わせて、「平均値+標準偏差」が平均値の約2倍になるという程度のばらつきを最低限考慮すべきだということになる。これこそが被告の取り入れるべき最新の知見であり、不確かさを考慮して認識論的不確定性をできるだけゼロに近づける努力をして導出した耐専スペクトルや断層モデルによる地震動解析結果に対して、さらに偶然的な不確定性を考慮し、少なくとも「平均値+標準偏差」に相当する約2倍への引上げを考慮すべきであろう。



ここで、参考になるのが、2004年北海道留萌支庁南部地震 ($M6.1, M_w5.7$) のHKD020観測点での地震観測記録である。被告は、この基盤波に基づき、伊方3号の解放基盤表面はざとりに波に換算し「震源を特定せず策定する地震動」として基準地震動に取り入れているので、よく知っているはずである。左の図Aが同地震のK-NET

図A 2004年北海道留萌支庁南部地震のK-NETおよびKiK-net観測点の最大加速度の距離減衰と司・翠川(1999)による距離減衰式(実線が平均、破線が平均±標準偏差)との比較(出典：佐藤浩章・芝 昭和・東 貞成・功刀 卓・前田宜浩・藤原広行，物理探査・室内試験に基づく2004年留萌支庁南部の地震によるK-NET港町観測点(HKD020)の基盤地震動とサイト特性評価電力中央研究所報告N13007(2013年12月))

および KiK-net 観測点の最大加速度 PGA の距離減衰と司・翠川(1999)による距離減衰式との比較である。この図より「HKD020(EW)」の最大加速度が「平均値+標準偏差」(平均値の約 2 倍)の破線をかかなり越え、「平均値の約 3 倍」になっているのが分かる。この地震が起こる前には距離減衰式の平均値の実線で予測する以外になく、たとえ認識論的不確定性によるばらつきを考慮して 1.5 倍に引上げていたとしても(耐専スペクトルで内陸補正をしない場合がこれに相当する)、さらに 2 倍の偶然的な不確定性等が存在していることになる。

被告は、「詳細な調査により本件発電所における地域特性を十分に把握していること、原子力発電所の地震動評価に用いられる手法は高度に発展してきた手法で精微な想定が可能となっていること、地震動評価にあたっては、保守的な結果となるよう不確かさを十分に考慮し、諸条件を厳しめに設定していることから、本件発電所において想定される地震動は決して平均像などではなく、適切に基準地震動を設定していることを主張してきた」(pp. 57-58)としているが、これらはすべて「認識論的不確定性に関するばらつき」を小さくするための努力であり、確かに全国的な「平均像」ではなく、震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性からなる地域性を一定程度考慮した「特定地域における平均像」だとは言えるが、必ずしも認識論的不確定性のばらつきがゼロになったわけではなく、偶然的な不確定性の観点から見れば、それはあくまで「平均像」にほかならない。なぜなら、偶然的な不確定性を低減することは不可能であり、その平均値は認識論的不確定性をゼロにした「平均像」にほかならないからである。

被告は、断層モデルについて「経験的グリーン関数法は、敷地での観測記録を用いることから、震源特性、伝播特性及び増幅特性を含んだものであり、敷地における地域特性を適切に反映した評価が可能である。」(p. 60)としているが、ここで用いられている要素地震はスラブ内地震であり、内陸地殻内地震より応力降下量が大きく、内陸地殻内地震の地震動解析を行う際には要素地震波形が応力降下量の比で小さく補正されるため、地震動が過小評価されるおそれがある。ところが、この震源特性の違いを考慮した地震波形の補正は震源距離による補正以外は行われていない。これは認識論的不確定性が大きく残る一因である。また、「本件発電所では、適当な内陸地殻内地震の観測記録がないものの、耐専スペクトルを適用する際には、内陸補正を行わないことなどにより、評価の保守性を確保している。」というが、それは、2007 年新潟県中越沖地震で明らかになった「震源特性が 1.5 倍に大きい」という認識論的不確定性を反映させているにすぎない。また、被告は、「地震観測記録、深度ポーリング等を踏まえた評価を行い、本件発電所の地盤は地震動を増幅させるような特異性を有するものではないことを確認するとともにポーリング調査結果等を踏まえ、地震動評価における地盤物性を適切に設定している。」と主張するが、これも全国平均とは異なる地域特性を考慮することで認識論的不確定性のばらつきを小さくしているにすぎない。さらには、「応答スペクトルに基づく地震動評価に用いられた距離減衰式は、どれも本件発電所敷地の解放基盤表面(S 波速度 2600m/s)よりも軟らかい(S 波速度が小さい)地盤の地震動を対象としたものであることから、地盤の増幅特性についても保守的な評価を行っていると言える。」(pp. 60-61)と主張するが、極めて抽象的であり、定量的に保守性を主張できる代物ではない。

以上のように、被告は「原告らが主張する誤差やばらつきを考慮する必要がなく、被告が不確かさを考慮して策定した基準地震動 S_s が平均像ではないことを説明する」(p. 58)として行った説明は極めて混乱しており、基本的に認識論的不確定性と偶然的な不確定性を区別できておらず、「被告の主張はあくまで認識論的不確定性のばらつきを小さくする枠内での話にすぎない」ことに全く気付かず、「本質的に低減できない偶然的な不確定性には、認識論的不確定性をできるだけ小さくした上で、地震動評価結果(地域性を考慮した平均像)を少なくとも 2 倍にして 1 標準偏差分相当の余裕をとるなどの手段以外に手が無い」ことにも配慮しない全く独善的な説明に陥っている。

(ウ)

被告は、「震源を特定せず策定する地震動は、詳細な調査に基づく『敷地ごとに震源を特定して策定する地震動』の策定に最大限の努力を払うことが前提にあり、それでも評価し損なう敷地近傍の地震に対する備え、つまり、念のための補完的な位置付けなのであって、最大限を想定しなければならないような性格のものではない。」(p.62)と主張するが、このことによって、「被告の審査ガイドへの無理解」を吐露したことに気付かないのは極めて深刻な問題である。原子力規制委員会の「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」(平成25年6月)の「基本方針」には次のように記されている(下線は引用者)。

「2. 基本方針

基準地震動の策定における基本方針は以下の通りである。

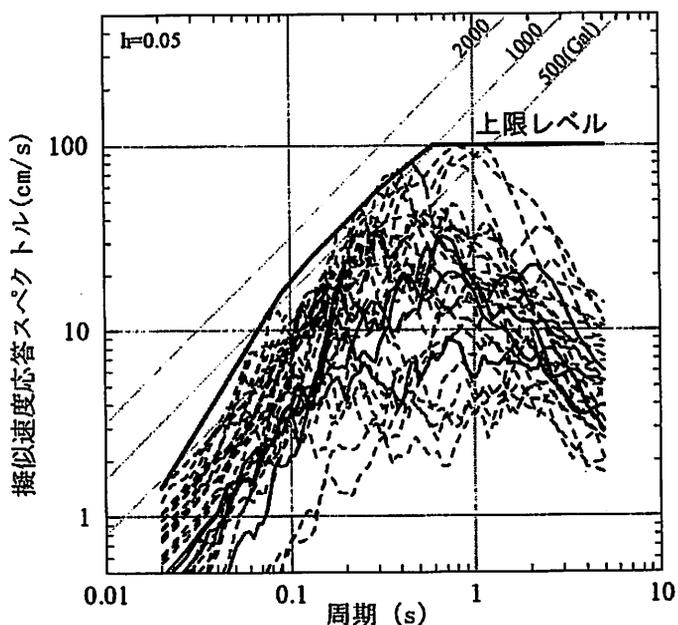
- (1) 基準地震動は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について、それぞれ解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動として策定されていること。
- (2) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」は、内陸地殻内地震、プレート間地震及び海洋プレート内地震について、敷地に大きな影響を与えると予想される地震(以下「検討用地震」という。)を複数選定し、選定した検討用地震ごとに不確かさを考慮して、応答スペクトルに基づく地震動評価及び断層モデルを用いた手法による地震動評価により、それぞれ解放基盤表面までの地震波の伝播特性を反映して策定されていること。不確かさの考慮については、敷地における地震動評価に大きな影響を与えると考えられる支配的なパラメータについて分析した上で、必要に応じて不確かさを組み合わせるなどの適切な手法を用いて評価すること。
- (3) 「震源を特定せず策定する地震動」は、震源と活断層を関連づけることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を収集し、これらを基に各種の不確かさを考慮して、敷地の地盤物性に応じた応答スペクトルを設定して策定されていること。
- (4) 「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」を相補的に考慮することによって、敷地で発生する可能性のある地震動全体を考慮した地震動として策定されていること。」

この審査ガイドのどこに、「震源を特定せず策定する地震動」が「念のための補完的な位置づけ」であるとか、「震源を特定して策定する地震動」の「策定に最大限の努力を払うことが前提」であるとかが書かれているのであろうか。両者は全く同列に同じ比重で書かれており、両者を「相補的に考慮すること」によって基準地震動を策定するように指示されているのである。被告の不勉強を補うため敢えて解説すれば、「震源を特定して策定する地震動」は、プレート境界地震や海洋プレート内地震のように繰り返し活動していて震源断層の位置と規模を特定できるものや、内陸地殻内地震のうち地表や表層で活断層や撓曲等として震源断層が現われるような比較的規模の大きな地震を対象としており、「震源を特定せず策定する地震動」は、内陸地殻内地震のうち地表等に震源断層等が現われず、いくら精査しても震源断層の存在を見つけにくい比較的規模の小さな地震を対象としている。後者では、その存在を予知できないことから、原発直下でも起こりえて、震源近傍では小規模地震でも極めて大きな地震動をもたらすおそれがあることから、「震源を特定して策定する地震動」とは区別して策定することが求められているのである。このような位置づけの下、審査ガイドでは、「震源を特定せず策定する地震動」は「震源と活断層を関連づけることが困難な過去の内陸地殻内の地震について得られた震源近傍における観測記録を収集し、これらを基に各種の不確かさを考慮して」策定するように指示している。

被告は、「原告らは、活断層と関連付けることができる地震の観測記録が震源を特定せず策定する地震動の評価対象となっていないことを批判するが、地震動評価の基本は、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動である。観測記録が活断層と関連付けることができるのであれば、敷地ごとに震源を特定して策

定する地震動として詳細評価の対象として扱った方がより高い精度での評価が可能となるのであり、あえて震源を特定せず策定する地震動として評価する必要性はない。また、震源を特定せず策定する地震動は、統計学的に予測しようとするものでもないの、評価対象として例示されているのが16地震より多ければ評価の精度が上がるといったものでもない。」(p. 62)と主張する。しかし、この「16地震」は、1995年兵庫県南部地震を契機に地震観測網が拡充された結果、1996～2011年の15年間にやっと収集されたものであり、被告が基準地震動として採用している「2004年北海道留萌支庁南部地震」は今から12年前には存在しなかった。このような地震観測記録の絶対的な不足と歴史的制約を認識することなくしては、「震源を特定せず策定する地震動」を適切に策定することなどできない。地震観測記録の不備を補うためには、震源断層の再現モデルの利用や断層モデルによる震源近傍での地震動解析などさまざまな手法が取り入れられるべきであり、将来起こりうる見えない地震によって原発が重大事故を起こさないよう、「震源を特定せず策定する地震動」を慎重に策定すべきである。また、地震が起きた後で精査した結果として「活断層と関連付けることができる地震」であったと判断されたとしても、事前には関連づけることが難しいのが現実である。そのため、審査ガイドでは「震源を特定せず策定する地震動」の「検討対象地震の選定においては、地震規模のスケールリング(スケールリング則が不連続となる地震規模)の観点から、『地表地震断層が出現しない可能性がある地震』を適切に選定していることを確認する。」とわざわざ指示しているのである。ここに「スケールリングの観点から」とあるのは、震源断層が未飽和断層から飽和断層に変わる転換点となる地震規模、すなわち、M6.8程度までは震源断層が地表に現われにくく、前原子力規制委員長代理の島崎(2008)は「予め震源が特定できない地震の最大規模はM7.1程度と考えられる」(島崎邦彦, 震源断層より短い活断層の長期予測, 日本活断層学会 2008年度秋季学術大会予稿集 S-05)と指摘しており、これらの知見を十分考慮すべきだということである。つまり、M7.1以下の地震による地震観測記録については、たとえ事後に「活断層と関連付けることができ」たとしても、適切に活用すべきだということになる。この点では被告も熟知しているはずの次のような例がある。

被告は、収集した観測記録を「加藤ほか(2004)の地震動レベル」と対比して「震源を特定せず策定する地震動」として敷地に及ぼす影響が大きいと考えられる地震を抽出しているが、この「地震動レベル」の策定時には「M6.8を境に断層パラメータのスケールリングが変わることから確実に事前に震源を特定できるとは断定できない」との方針を採用していた。加藤ほか(2004)によれば、震源断層最短距離20km以内の第三紀以前の硬質地盤で観測された16地震(M6.2～7.3の国内5地震とMw5.8～7.0のカリフォルニア11地震)の観測記録をわざわざ収集しながら、「地表地震断層が現れた地震」や「周辺の活断層や活褶曲構造などから起こりうる」と推定できる地震を次々と除外し、残ったのは「1997年3月26日と5月13日の鹿児島県北西部地震(M6.6とM6.4の2地震)」だけだった。図Bの青実線(波線)がこれら2地震の鶴田ダムでの地震観測記録の応答スペクトルだが、非常に小さく、これを包絡するように「上限レベル」を設定したのでは余りにも説得力がない。そこで、「事前に震源の位置と規模を評価できた可能性がある」として除外した地震のうちM6.5未満(Mw6.2未満)のカリフォルニア7地震については、「M6.8を境に断層パラメータのスケールリングが変わることから確実に事前に震源



図B 加藤ほか(2004)の地震動レベル(上限レベル)

を特定できるとは断定できない」との方針を採用して復活させ、これらで「記録の少なさを補う方針とし」、41 地震中わずか 9 地震、事実上、カリフォルニア 7 地震の応答スペクトルを包絡するように作られたのが加藤ほか(2004)の地震動レベルなのである。つまり、最初からこの方針のもとでカリフォルニア 7 地震に限らず M6.8 以下の全地震観測記録を系統的に収集して包絡させるべきだといえるのである。被告は加藤ほか(2004)の地震動レベルを熟知しているのであるから、このような経緯を知らないはずはなからう。

(2) オについて

被告は、「耐専スペクトルの適用性については、その策定後においても、震源近傍における観測記録などによる検証がなされており(図 7 で青色の▲及び◆でプロットされたデータ)、データベースの範囲外の地震でも適用できる事例があることも確認されている」と認めており、2000 年鳥取県西部地震(M7.3)における賀祥ダム(等価震源距離 6km)での記録は耐専スペクトルと良く合っていることが原子力安全委員会の作業部会でも確認されていることを念頭に置き、極近距離内でも耐専スペクトルの適合性が確認されていることを認めざるを得なくなっている。ところが、何の根拠もなく、『「極近距離」より近い等価震源距離の地震(図 7 では黄緑色で示した線より左側に位置する観測記録)については、検証に用いられた観測データが少なく、コントロールポイントも設定されていないことから、原則的には適用範囲外と考えられ、適用する場合には十分な検討が必要とされている。」(p. 67)と適用性を否定している。また、「評価結果の妥当性を検証するためには、実際の観測記録と比較する方法もあるが、活断層による地震(内陸地

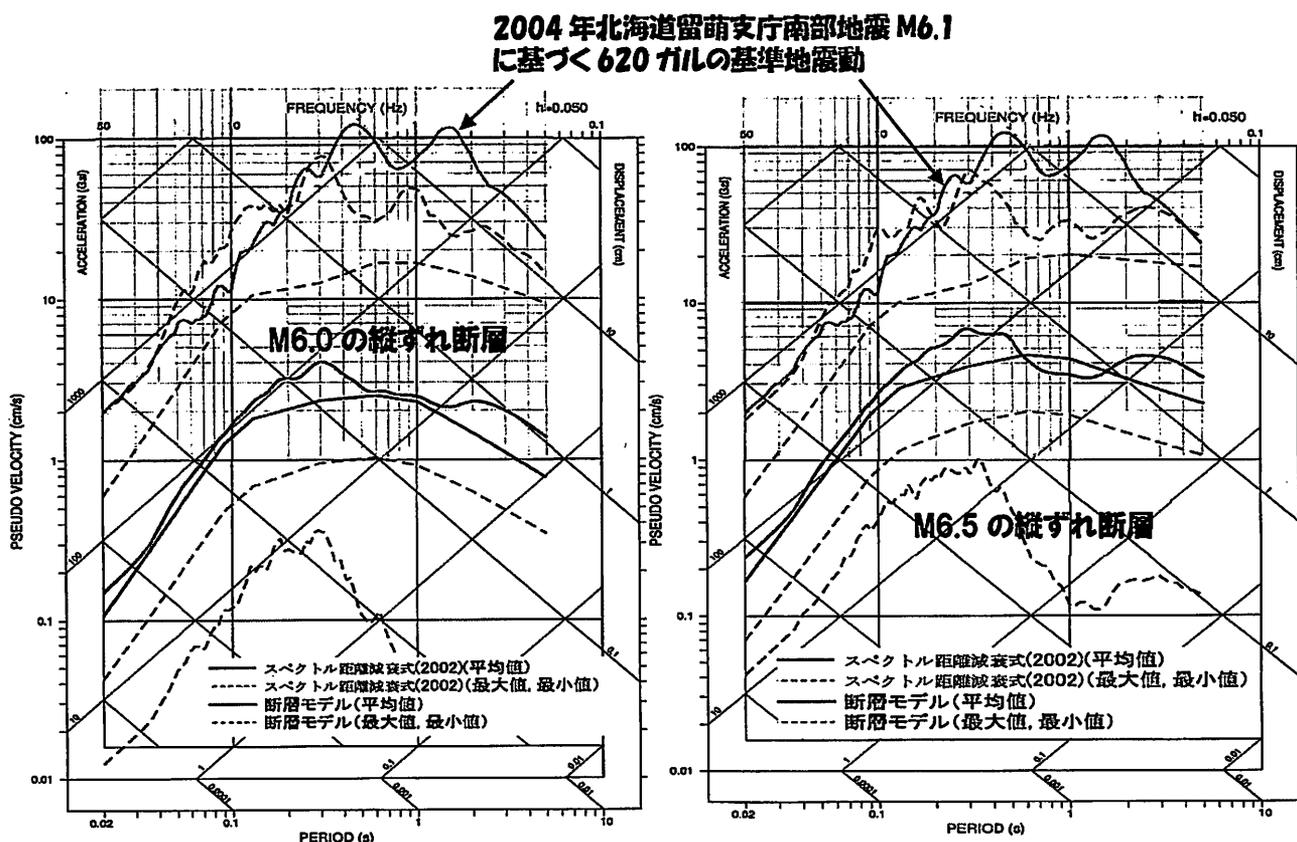


図 C 伊方 3 号の基準地震動 Ss-3 として採用された「2004 年北海道留萌支庁南部地震(M6.1, Mw5.7)の 620 ガルの解放基盤表面はざとり波」(最上部の緑波線)と対応する耐専スペクトル(上部の青破線)および JNES の断層モデルによる地震動解析結果(最上部の赤破線) (出典: 独立行政法人原子力安全基盤機構, 平成 15 年度震源を特定しにくい地震による地震動の検討に関する報告書, JNES/SAE04-07004 解部報-0070(2004.9)に留萌支庁南部地震を加筆)

殻内地震)については、発生間隔が長く観測記録も少ないことから、他の手法による評価結果と比較を行う方法によることが合理的である。」(p. 69)と他の距離減衰式との比較を持ち出しているが、実際の観測記録と比較する方法は存在する。被告が基準地震動 Ss-3 として採用している「2004 年北海道留萌支庁南部地震(M6.1, Mw5.7, 傾斜角 25°)の 620 ガルの解放基盤表面はざとり波」(以下「留萌支庁南部地震はざとり波」と呼ぶ)と耐専スペクトルを比較すると、図 C のようになる。図 C は原子力安全基盤機構 JNES が 2004 年の報告書で示した図に留萌支庁南部地震はざとり波を追記したものである。JNES は、傾斜角 45° の M6.0(左)および M6.5(右)の逆断層(縦ずれ断層)が活動する場合を想定し、断層周辺 40km×80km 四方を 4km 間隔で 11×21=231 の観測点を地震基盤上に設置し、各観測点で耐専スペクトル(図 C では「スペクトル距離減衰式(2002)」と記されている)と JNES 独自の断層モデルによる地震動解析結果(応答スペクトル)を求め、その平均(実線)と最大・最小値(破線)を描いている。図 C の最大値(上部の赤破線と青破線)は震源断層の基盤表面投影線から数 km 以内の近傍観測点で得られており、JNES 独自の断層モデルによる地震動解析結果(上部赤破線)は留萌支庁南部地震はざとり波と良く一致しているが、耐専スペクトル(上部青破線)は留萌支庁南部地震はざとり波よりかなり小さく、過小評価になっていることがわかる。ただし、留萌支庁南部地震の傾斜角は 25° だが、この傾斜角での解析結果が存在しないため、図 C では傾斜角 45° の解析結果と比較している。傾斜角 25° では等価震源距離が少し小さくなるため耐専スペクトルはもう少し上がると思われるが、傾斜角 45° での留萌支庁南部地震はざとり波との 2 倍弱～8 倍の差を埋めるほどではないと考えられ、過小評価の傾向は変わらない。つまり、耐専スペクトルは震源近傍で「過大」になるところか、「過小」になることが留萌支庁南部地震はざとり波との比較で明らかではないだろうか。

被告は、「断層長さ約 480km のケースは鉛直、北傾斜ともに耐専スペクトルが適用できる範囲にあるものの、断層長さ約 130km, 約 69km 及び約 54km のケースは、いずれも『極近距離』よりも左側に位置し、基本的には適用外の範囲にあるため、適用にあたっては慎重な検討が必要であり、特に、鉛直ケースについては耐専スペクトルの検証に用いた観測記録がない範囲である。」(p. 69)としているが、480km についても観測記録はなく、耐専スペクトルの 480km への適用はやはり外挿にほかならない。この点について被告はなぜ矛盾を感じないのであろうか。もっと大きな矛盾点は、断層長さ約 480km のケースには、本来、断層長さ約 130km, 約 69km 及び約 54km のケースが含まれているにもかかわらず、なぜ、480km の耐専スペクトルが 130km, 69km, 54km の耐専スペクトルより小さいのか。その他の距離減衰式を見れば、54km から 69km, 130km, 480km と断層が長くなるほど応答スペクトルが大きくなっている。耐専スペクトルは逆に、69km から 130km, 480km と断層長さが長くなるほど応答スペクトルが小さくなっている。これは、耐専スペクトルの最大の問題点であって、断層が観測点付近から遠方へ伸びていく場合には、断層長さによる地震規模の増大による耐専スペクトルの上昇よりも等価震源距離の増大による耐専スペクトルの下降のほうが大きく効いてくるため、断層が伸びるほど耐専スペクトルが小さくなっていくのである。この問題点は原子力安全委員会による浜岡原発の審査会合ですでに明らかになっており、被告も原子力規制委員会もよく知っているはずである。ただし、54km から 69km へと東西へ少し広がる場合には等価震源距離はそれほど変わらず、応答スペクトルは上昇する。つまり、54km ないし 69km のケースでは耐専スペクトルが比較的正しく機能しているとみなせるのである。被告は、480km が「適用範囲内」だと主張するが、耐専スペクトルの欠陥が顕著に現れる 480km ケースについては、むしろ耐専スペクトルは適用できないと判断すべきであり、この点に何の疑問も感じなかったとすれば、耐専スペクトルの適用性を本当の意味で理解していないことになる。むしろ、54km や 69km で耐専スペクトルを適用できないとする根拠がないことについて再度よく反省すべきであろう。

さらに、距離減衰式については、震源近傍で地震動が飽和するとの仮定を置いているが、どのレベルに飽和するのかについては地震観測記録が少なく、震源近傍で過小評価している可能性が高い。被告が比較

対象にしている距離減衰式の地震データは、2003年までの記録にすぎず、国内記録は少ない。現に、2004年留萌支庁南部地震では図Aの震源近傍のHKD020観測点で「平均値＋標準偏差」を超える大きな地震動が観測されているし、最近20年間の震源近傍での観測記録には非常に大きなものが含まれているが、これらは被告の用いた距離減衰式にも耐専スペクトルにも反映されていない。加えて、これらの距離減衰式では、短周期レベルAを説明変数に取り込んでいる片岡・他(2006)を除き、断層からの最短距離が等しい場合、断層長さから算出する地震規模が変わらない限り、震源断層が傾斜していても、アスペリティがどこに位置していても、応答スペクトルは変わらない。現に、54km、69km、130kmのいずれにおいても、鉛直ケースと北傾斜ケースとで距離減衰式による応答スペクトルは変わらない。30°北傾斜で断層面積は2倍に増えるため、アスペリティ面積が2倍、短周期レベルが約1.4倍に増えることから、アスペリティ位置がやや遠ざかるとはいえ、地震動の応答スペクトルは鉛直ケースより北傾斜ケースのほうがやや大きくなると予想される。断層モデルによる地震動解析結果ではそうなっている。ところが、耐専スペクトルでは下がっている。これは、耐専スペクトルでは等価震源距離によってしか震源特性を反映させることができないからであり、被告は示していないが、南傾斜ケースでは等価震源距離が小さくなるため、鉛直ケースより大きくなると期待される。つまり、被告は、耐専スペクトルの鉛直ケースは「距離減衰式から大きくかい離している」(p.72)からといって採用せず、耐専スペクトルが本来苦手とし対応しきれない「北傾斜ケース」や「480km」ケースを採用しているのである。耐専スペクトルの特徴を踏まえ、また、鳥取県西部地震での賀祥ダムの記録や北海道留萌支庁南部地震のHKD020観測点の記録から耐専スペクトルは極近距離内でも適用可能であること、むしろ、震源近傍では過小評価になっている可能性が高いことを踏まえるならば、54kmや69kmの鉛直ケースを採用し、余裕を持たせるべきである。これらの耐専スペクトルが「距離減衰式から大きくかい離している」(p.72)としても、それは被告の用いた距離減衰式の問題点を示しているのであって、これらの距離減衰式では震源近傍の地震観測記録が少なく、また、震源特性を適切に反映させることのできないモデルであるため、震源特性が顕著に現れる震源近傍の観測点では過小評価にならざるを得ないことを良く踏まえ、その適用を誤らないことである。ちなみに、短周期レベルAを説明変数に取り込んでいる片岡・他(2006)の応答スペクトルでは、鉛直ケースでは他の距離減衰式より小さめになっているところ、北傾斜ケースでは鉛直ケースより大きくなり、他の距離減衰式に近づいている。これは北傾斜ケースで短周期レベルAを大きくしているためだと考えられる。

したがって、被告は「断層長さ約130km、約69km及び約54kmの鉛直のケースについては、いずれも耐専スペクトルの適用は適切ではないと判断された。一方、その他の距離減衰式は、いずれのケースにおいても適用できることから、断層長さ約130km、約69km及び約54kmの鉛直のケースについては、その他の距離減衰式を採用することとした。」(pp.72-73)としているが、この判断は根本的に間違っている。震源断層近くにある原発の地震動評価に際して、「等価震源距離が大きくなる480kmケースや北傾斜ケースへの耐専スペクトルの適用」こそが適切ではなく、「震源特性を正しく反映できない『その他の距離減衰式』の震源近傍での採用」こそが適切ではないのである。これを見逃した原子力規制委員会の判断にも「過誤があった」と言わざるを得ない。

関西電力株式会社高浜発電所3・4号機では「極近距離」より近くで耐専スペクトルを適用していることを原告から指摘されたことについて、被告は「本件発電所において適用しなかったケースの方が、適用範囲とされる『極近距離』からのかい離が大きいことは事実である。しかも、被告は、『極近距離』からのかい離が大きいというだけで適用性を判断したのではなく、地震動評価の適正さを確保しつつ保守的な評価を行う観点から、その他の距離減衰式による評価結果及び断層モデルを用いた手法による地震動評価結果との比較を行うことにより、耐専スペクトルの適用性について総合的な検証を行い、その結果、断層長さ約130km、約69km及び約54kmの鉛直のケースについては、耐専スペクトルを適用するのは適切ではないとの結論を得たものであり、被告の判断は適切かつ合理的なものである。」(pp.73-74)と主張す

るが、上記の指摘に鑑みれば、被告は「総合的な検証」を行う能力に欠けており、「総合的な検証」の前提となる耐専スペクトルと距離減衰式に関する基本的な知識に欠けていることはもはや明白であろう。

被告の採用した距離減衰式による応答スペクトルは平均像にすぎないが、その平均像すらも地震観測記録の母集団の違いや回帰式の違い等によって大きく異なっており、被告の試算した 54km, 69km, 130km, 480km のどのケースをとって見ても、距離減衰式による応答スペクトルの差は周期 0.02~0.5 秒で 2 倍程度の差がある。これは認識論的不確定性が大きく関与していると考えられるが、それぞれの回帰式にはそれぞれにまた、偶然的な不確定性をもう一つの要因として、大きなばらつきが存在する。被告は、地域性を考慮すればばらつきは考慮しなくても良いと主張しているが、耐専スペクトルに限らず、その他距離減衰式においても、地域性を考慮してもなお残る大きなばらつきが避けられないことを、各論文に基づいて、以下に改めて具体的に指摘しておく。

Kanno et al. (2006) は、1963~2003 年の国内 73 地震(プレート境界地震と混在)を基本にしているが、国内データには大地震の震源近くのデータが不十分なため、米国カリフォルニアとトルコの 10 地震のデータを追加している。その際、台湾集集(Chi-Chi)地震については、(1)震源近傍観測点以外では振幅が顕著に小さい、(2)台湾は非常に破碎の進んだ大陸プレート境界に位置する、(3)地殻内の地震波伝播特性が他の地域と異なる可能性があるとの理由から除外している。こうして絞った地震データによる解析でも、深さ 30km 未満の浅い地震の回帰応答スペクトルの対数標準偏差は最大加速度 PGA で 0.37(「平均値+標準偏差」は平均値の $10^{0.37}=2.3$ 倍になる)、周期 0.05~0.5 秒で 0.37~0.41(2.3~2.6 倍)と大きい。つまり、この距離減衰式を基準地震動に用いる場合には、少なくとも「平均値+標準偏差」とし、平均値の 2.3~2.6 倍にしなければ、留萌支庁南部地震の場合のように震源近傍で大幅な過小評価に陥る可能性が高いといえる。

Zhao et al. (2006) は、2003 年までの国内地震 4,518 記録(Mw6.9 以下の内陸地殻内地震 1,285 記録、Mw8.3 以下のプレート間地震 1,508 記録、Mw8.3 以下のスラブ内地震 1,725 記録)と国外地震 208 記録(Mw7.4 以下の米国・イラン内陸地殻内地震 196 記録、プレート間地震 12 記録)を対象にしているが、国内記録では 10km 以内のデータは兵庫県南部地震と鳥取県西部地震に限られており、40km 以内の地震データは米国と 1978 年 Tabas Iran 地震に大きく制約されている。回帰応答スペクトルの自然対数標準偏差は最大加速度 PGA で 0.723($e^{0.723}=2.06$ 倍)、周期 0.05~0.5 秒で 0.760~0.849($e^{0.760}\sim e^{0.849}=2.14\sim 2.34$ 倍)と大きい。この自然対数標準偏差は地震内と地震間で分離して求められていて、周期 0.02~0.5 秒で、地震内 0.60~0.70(1.8~2.0 倍)、地震間 0.39~0.49(1.5~1.6 倍)であり、地震内のばらつきのほうが大きい。したがって、この距離減衰式においても、少なくとも平均値の 2.1~2.3 倍にしなければ、震源近傍で大幅な過小評価に陥る可能性が高いといえる。

内山・翠川(2006) は、1968~2003 年の国内 52 地震のデータ(内陸地殻内地震 13 は Mw5.5~6.9、プレート間地震 23 は Mw5.5~8.2、プレート内地震 16 は Mw5.5~8.3)を対象にしており、海外の地震は含まれていない。回帰応答スペクトルの対数標準偏差は周期 0.02~0.5 秒で 0.35~0.40($10^{0.35}\sim 10^{0.40}=2.2\sim 2.5$ 倍)であり、地震内と地震間では地震内 0.30~0.33(2.0~2.1 倍)、地震間 0.15~0.24(1.4~1.7 倍)と地震内のばらつきのほうが大きい。この場合も、少なくとも平均値の 2.2~2.5 倍にしなければ、震源近傍で大幅な過小評価に陥る可能性が高いといえる。

片岡・他(2006) は、1978~2003 年の国内 183 地震のデータ(内陸地殻内地震 47 は Mw4.9~6.9 の 5,160 波形、海溝性地震 136 は Mw5.2~8.2 の 5,882 波形)を対象に、内陸地殻内地震でも短周期レベル A が国内の地域ごとに異なることから、短周期レベル A を回帰式に取り込んでいる。その結果、最大加速度の対数標準偏差は 0.135($10^{0.135}=1.36$ 倍)、うち地震内 0.129($10^{0.129}=1.35$ 倍)、地震間 0.041($10^{0.041}=1.10$ 倍)、とかなり小さくなっている。この場合、地震波形からコーナー周波数 f_0 を求め、 $A=4\pi^2 f_0^2 M_0$ より

個別に短周期レベル A を算出している。したがって、地震観測記録がない状態で地域や地震によって異なる短周期レベルを正確に求められなければ、逆に、ばらつきが大きくなる。片岡・他(2006)は短周期レベル A を取り込まない回帰式も求めているが、この場合の最大加速度の対数標準偏差は $0.169(10^{0.169}=1.48$ 倍), うち地震内は $0.129(10^{0.129}=1.35$ 倍)と変わらず、地震間は $0.110(10^{0.110}=1.29$ 倍)とやや大きくなるが、それでも他の距離減衰式と比べると少し小さい。その理由は、地震データの母集団が違うからかも知れないが、今のところ不明である。

他の 5 つの距離減衰式 (Abrahamson and Silvia(2008), Boore and Atkinson(2008), Campbell and Bozorgnia(2008), Chiou and Youngs(2008), Idriss(2008)) は、米国で 2003 年に選ばれた次世代型距離減衰式の開発プロジェクト(NGA プロジェクト)の 5 チームによるものであり、内陸地殻内地震に関する距離減衰式を求める目的で、全世界から内陸地殻内地震に限ったデータベース(173 地震 3,551 記録)が構築されたが、チームによって回帰に用いたデータの母集団はかなり異なる。5 チームの全著者による比較解説 (Abrahamson et al., Comparison of the NGA Ground-Motion Relations, Earthquake Spectra, 24-1, pp. 45-66(2008))によれば、Abrahamson and Silvia(2008)と Chiou and Youngs(2008)はほぼ 3/4 の地震と余震の全データを対象にし、Idriss(2008)は 4 割程度の地震に限り、余震記録についても岩盤記録に限っている。他方、Boore and Atkinson(2008)と Campbell and Bozorgnia(2008)はほぼ 1/3 の地震に厳選し、余震記録を除外している。翠川(地震強さの距離減衰式, 地震第 2 輯, 第 61 号, p. 471-477(2009))によれば、このデータベースで特徴的なのは、全データのほぼ半数が 1999 年台湾・集集 (Chi-Chi) 地震 Mw7.62 とその 5 余震 Mw5.90~Mw6.30 の記録が占め、大地震の震源近傍データはカリフォルニア地震以外の地震(1999 年 Kocaeli 地震 Mw7.51, 2002 年 Denali 地震 Mw7.90)によるものが大部分を占めている。日本の観測記録は 1995 年兵庫県南部地震の 22 記録が含まれているだけであり、基本的に日本以外の地震記録に対する距離減衰式である。しかも、1952~2003 年の古いデータであり、日本国内で兵庫県南部地震を契機に整備された地震観測網による 1996 年以降の地震観測記録は全く入っていない。

5 チーム全著者による比較解説によれば、応答スペクトルの回帰式は地震規模 M_w に分けて導かれ、それぞれについて中央値を平均像として求め、そのばらつきが図 D および図 E のように自然対数標準偏差で評価されている。図 D および図 E より、自然対数標準偏差は、地震規模や周期によって異なるが、周期 $0.02\sim 0.5$ 秒で $0.52\sim 0.85(e^{0.52}\sim e^{0.85}=1.68\sim 2.34$ 倍)であり、ほぼ 2 倍のばらつきがある。

以上のように、被告の用いた距離減衰式では、その平均像において距離減衰式の違いによって 2 倍程度の差があり、それぞれの距離減衰式ごとに、片岡・他(2006)を除き、標準偏差でほぼ 2 倍のばらつきが存在する。距離減衰式による違いは地震観測記録の母集団の違いが大きいと考えられるところ、被告の採用した距離減衰式はすべて 2003 年までの地震データにすぎず、震源近傍での地震観測記録は少ない。1996 年以降 20 年間の震源近傍を含む膨大な数の国内地震観測記録が、原発の耐震設計で採用される耐震スペクトルや距離減衰式に全く活用されていないことは極めて重大である。ましてや、地震観測記録は未だ不十分であり、今後すぐに M7 クラスの地震観測記録が震源近傍で得られる(地震計が震源近傍の存在する)保証もないことから、過去の地震記録におけるばらつきだけでなく将来起こりうる地震動のばらつきをも最大限に織り込むことが重要である。原発の耐震設計においては、地域性を考慮するなど認識論的不確定性をなくす努力を尽くして得られた平均像から、さらに、認識論的不確定性の残りと低減不可能な偶然的な不確定性を考慮して、少なくとも 1 標準偏差分の余裕を持たせ、少なくとも 2 倍へ引き上げることは最低限の義務であろう。

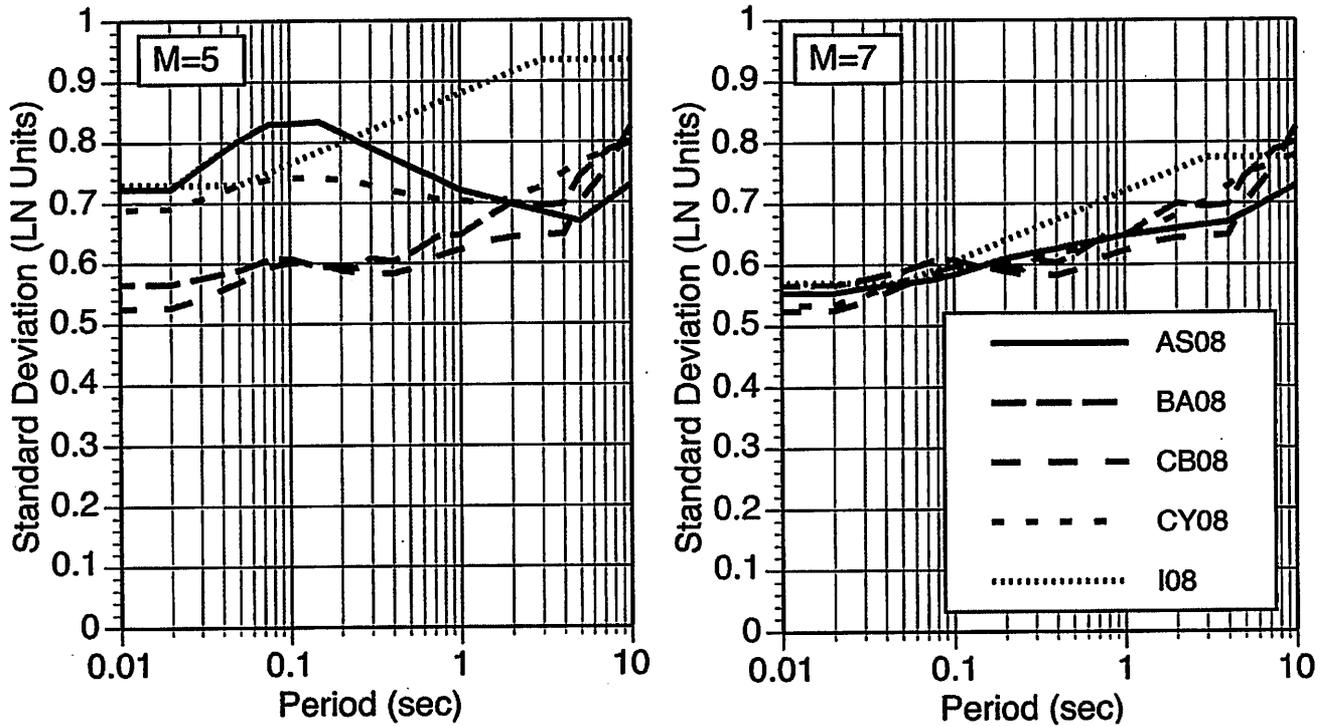


図 D 断層最短距離 30km 地点の岩盤観測点($V_{s30}=760\text{m/s}$)における Mw5(左)および Mw7(右)の横ずれ断層による応答スペクトルの自然対数標準偏差 (AS08=Abrahamson and Silvia(2008), BA08=Boore and Atkinson(2008), CB08=Campbell and Bozorgnia(2008), CY08=Chiou and Youngs(2008), I08=Idriss(2008))

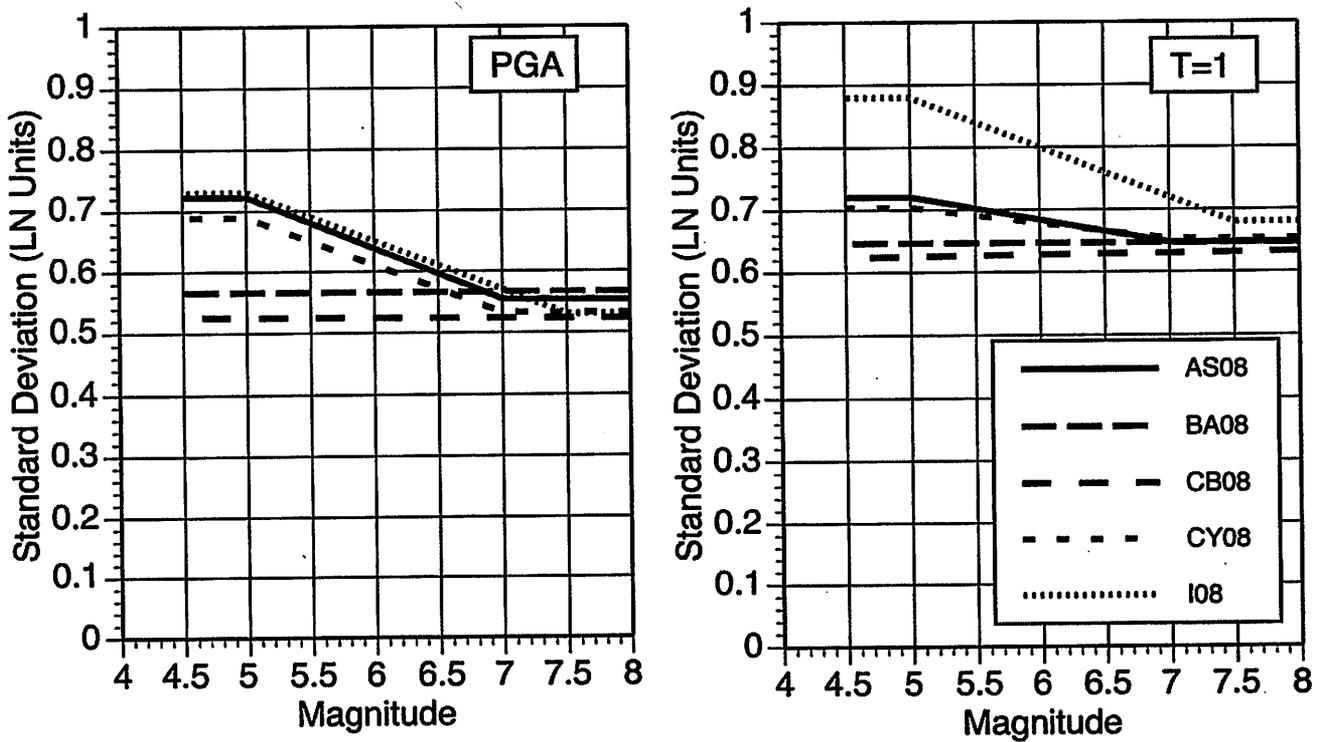


図 E 断層最短距離 30km 地点の岩盤観測点($V_{s30}=760\text{m/s}$)における横ずれ断層による最大加速度 PGA(左)および周期 1 秒での最大応答加速度(右)の自然対数標準偏差 (AS08=Abrahamson and Silvia(2008), BA08=Boore and Atkinson(2008), CB08=Campbell and Bozorgnia(2008), CY08=Chiou and Youngs(2008), I08=Idriss(2008))